

Моделирование потерь давления воздуха в оребренном трубном пучке воздушного конденсатора

03, март 2013

DOI: 10.7463/0313.0544307

Жинов А. А., Шевелев Д. В., Ананьев П. А.

УДК 621.175

Россия, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

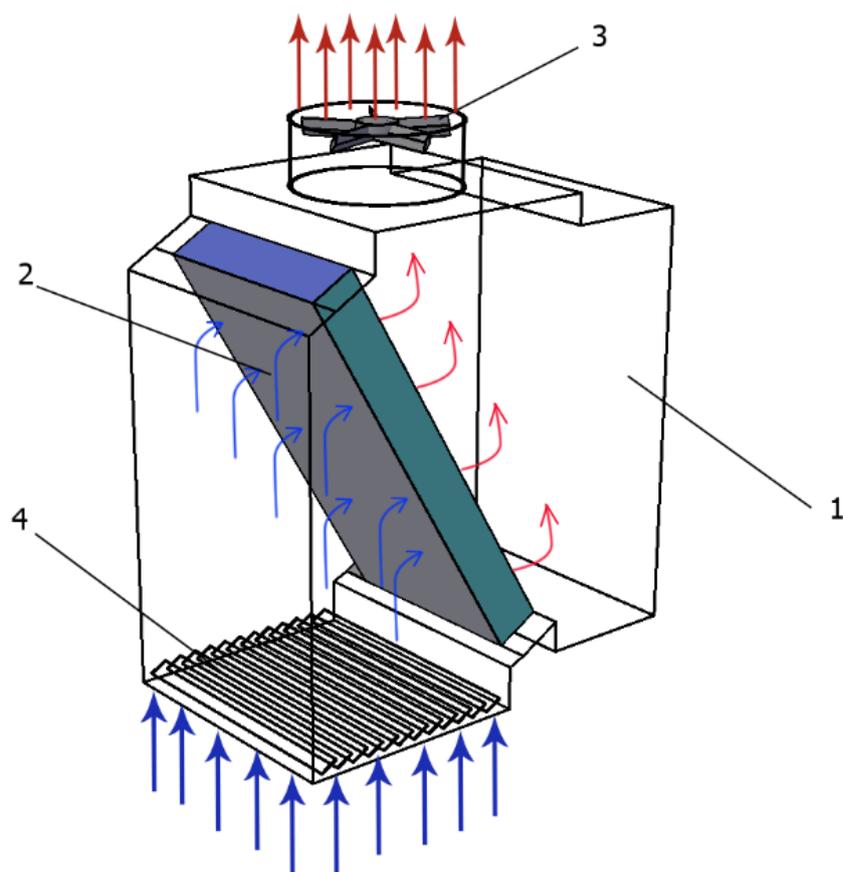
k1kf@bmstu-kaluga.ru

Введение

В настоящее время в паротурбинных и комбинированных энергоустановках все большее применение находят воздухоохлаждаемые конденсационные установки (ВКУ). Воздушные конденсаторы пара используют при дефиците охлаждающей воды, они компактны, хорошо вписываются в генплан энергоустановок и электростанций.

Наибольшее распространение получил воздушный конденсатор непрямого охлаждения [1], представляющий собой многорядный трубный пучок с наружным оребрением труб, собранных в коллекторы и расположенный в коробе (Рисунок 1).

Атмосферный воздух засасывается в короб конденсатора через проём в нижней его части. Для управления направлением входящего воздушного потока в проёме установлена регулируемая заслонка, образованная из плоских лопаток. Войдя внутрь короба, воздух проходит через трубный пучок, по трубкам которого движется конденсирующийся пар. Выброс нагретого воздуха в атмосферу осуществляется с помощью вытяжного вентилятора расположенного в верхней части короба.



1 – короб; 2 – трубный пучок; 3 – вытяжной вентилятор; 4 – управляемая заслонка

Рисунок 1 – Воздухоохлаждаемая конденсационная установка

В работах [2, 3] приводится опыт эксплуатации воздушных конденсаторов паротурбинных установок. Отмечается, что новым направлением в разработке и создании ВКУ являются введение конструктивных средств управления гидравлическими режимами течения конденсирующегося пара и использование программных комплексов численного моделирования для оптимизации работы ВКУ.

Важной задачей в создании высокоэффективных конструкций ВКУ является оптимизация течений воздуха внутри короба воздушного конденсатора. Это в перспективе может уменьшить мощность для привода вентилятора, исключить опасность замерзания трубок в холодное время года, учесть влияние ветра при выборе режима работы установки.

Известны работы по численному моделированию воздушных потоков в ВКУ. Так, в [4, 5] впервые описывается подход к двумерному численному моделированию потоков

воздуха в теплообменных установках с помощью CFD пакета Phoenics. Анализ расчетных данных и сравнение их с экспериментом позволило авторам сделать вывод о целесообразности использования CFD пакетов для решения задач аэродинамики ВКУ.

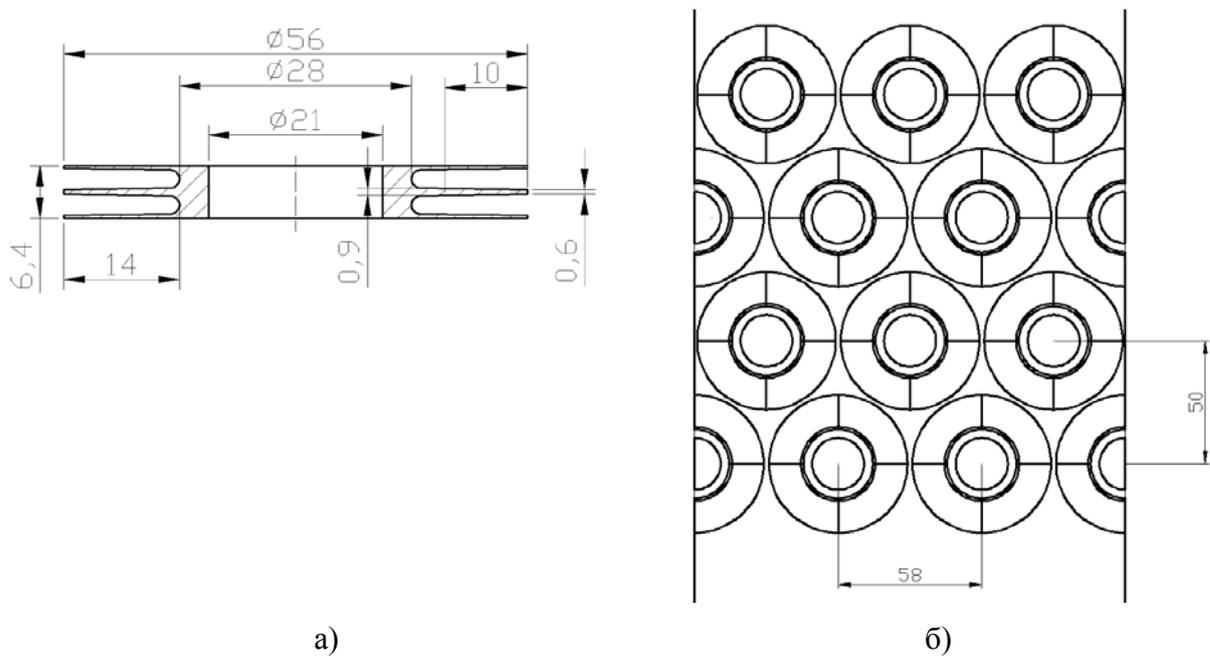
Развитие программной и аппаратной базы, сделало в настоящее время возможным численное 3D моделирование потоков воздуха в ВКУ с учетом характеристик используемых вентиляторов, влияния ветра, окружающих зданий и сооружений [6, 7].

В рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» ЗАО НПВП «Турбокон» ведется работа «Разработка технологии отвода тепла от паротурбинных установок энергоэффективными воздушными конденсаторами». В рамках этой программы стоит задача численного исследования потоков воздуха в модели макета высокоэффективной ВКУ.

Постановка задачи

Для численного исследования характеристик внутреннего течения воздуха использовалась модель макета ВКУ конструкции ЗАО НПВП «Турбокон», основные геометрические характеристики трубного пучка которой представлены на рисунке 2.

Ранее проведенные исследования показали [8], что для корректного определения потери давления воздуха в трубном пучке макета ВКУ при использовании CFD программ и прямом численном моделировании рассматриваемая модель должна иметь характерную расчетную область с поперечным размером не менее 0,15 x 0,064 м и содержать ~ 200 000 расчетных ячеек (Рисунок 2). Для всей оребренной трубной поверхности с поперечным габаритным размером 1,162 x 2,500 м количество расчетных ячеек составит в этом случае величину порядка ~ 60 000 000. Решить такую задачу проблематично даже с использованием вычислительных возможностей современных супер-ЭВМ.



а) поперечное сечение элемента оребренной трубки,
 б) сечение трубного пучка (вход воздуха снизу)

Рисунок 2 – Геометрические характеристики трубного пучка

Другой путь решения задачи расчета аэродинамики потоков воздуха внутри короба ВКУ – это замена оребренной трубной поверхности в расчетной модели анизотропным фильтром – обособленной зоной с заданным воздействием на рабочее тело по каждой из проекций вектора скорости на оси координат (Рисунок 3).

В этом случае для области потока, занимаемой фильтром, можно задать по каждому координатному направлению x, y, z величину силы сопротивления и тепловыделение.

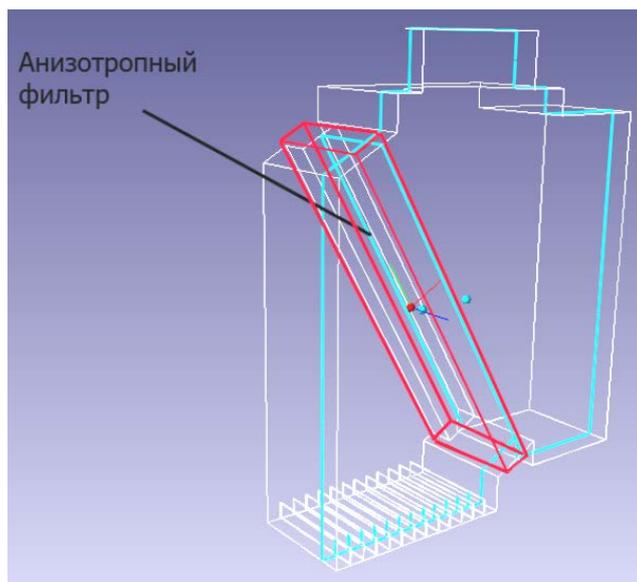


Рисунок 3 – Анизотропный фильтр в расчетной области

Таким образом, необходимо получить гидравлическую характеристику оребренного трубного пучка для задания свойств такого анизотропного фильтра.

Расчетная модель

Моделирование в использованных CFD пакетах построено на численном решении системы уравнений [9] вида

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0, \\
 \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \\
 \frac{\partial \rho i^*}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i i^*}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где

u – скорость;

$i = 1, 2, 3$ – номера осей координат (x, y, z);

ρ – плотность жидкости;

τ_{ij} – тензор касательных напряжений;

τ_{ij}^R – тензор напряжений Рейнольдса;

$i^* = i + \frac{u^2}{2}$ – энтальпия потока по параметрам торможения;

S_i – сила сопротивления;

ε – турбулентная диссипация;

Q – тепловыделение.

Сила сопротивления S_i в уравнениях Навье-Стокса в пределах рассматриваемого анизотропного фильтра может быть определена уравнением вида

$$S_i = -\mu D_i u_i - \rho E_i \frac{u_i^2}{2}, \quad (2)$$

где ρ и μ – плотность и молекулярная вязкость рабочего тела;

D_i [м^{-2}] и E_i [м^{-1}] – коэффициенты, которые задают силу сопротивления течению рабочего тела в каждом направлении x , y , z ;

При моделировании потока в трубном пучке с помощью анизотропного фильтра в направлении, параллельном оси труб, коэффициенты D_i и E_i можно задать бесконечно большими (влияние оребрения), а в направлении движения воздуха их значения определить из гидравлической характеристики трубного пучка. Гидравлическую характеристику оребренного трубного пучка можно получить путем натурального эксперимента или путем численного моделирования.

С помощью численного эксперимента была получена гидравлическая характеристика трубного пучка ВКУ ЗАО «НПВП Турбокон» путем исследования 3D модели представленной на рисунке 4

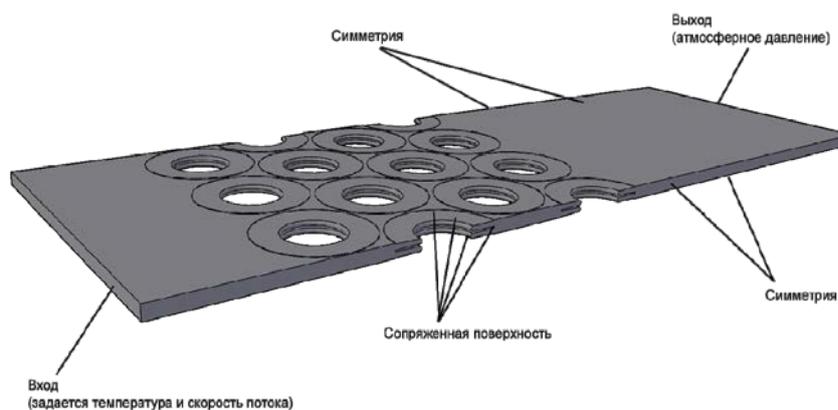


Рисунок 4 – Расчетная модель и граничные условия расчета

С целью верификации результатов моделирование проводилось в трех CFD-пакетах: FlowVision, Phoenics и OpenFOAM. В качестве расчетной использовалась турбулентная модель течения несжимаемой жидкости со стандартной $k-\varepsilon$ моделью турбулентности. Определение величины потери давления проводилось для скоростей воздуха во фронте трубного пучка $v_{фр} = 1 \dots 5$ м/с.

Полученные результаты

Гидравлическая характеристика трубного пучка макета ВКУ, полученная путем моделирования в различных CFD пакетах программ, представлена на Рисунке 5.

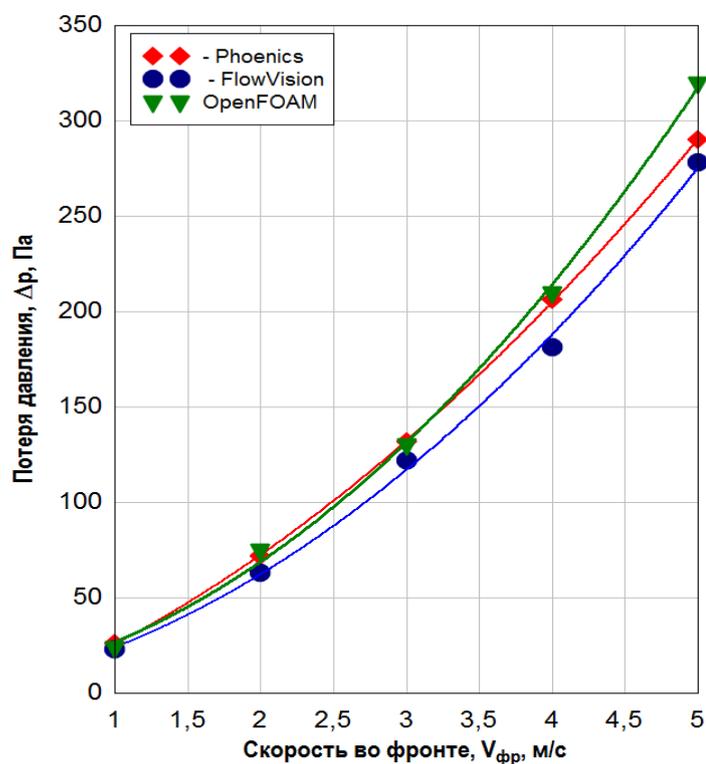


Рисунок 5 – Гидравлическая характеристика трубного пучка ВКУ

Из рисунка 5 видна хорошая сопоставимость результатов расчетов, полученных с помощью различных CFD пакетов программ.

Найденное значение величины потери давления позволяет определить силу сопротивления, действующую на поток в пределах трубного пучка по формуле

$$S = \frac{\Delta p}{L}, \quad (3)$$

где L – протяженность трубного пучка в направлении потока.

Зависимость силы сопротивления, создаваемая анизотропным фильтром, от скорости потока воздуха на входе в трубный пучок представлена на рисунке 6.

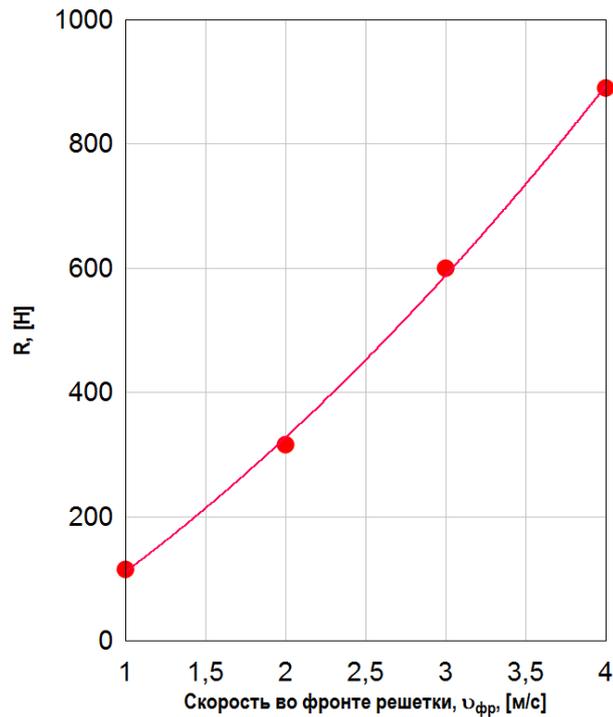


Рисунок 6 – Сила сопротивления, создаваемая анизотропным фильтром, в направлении основного потока воздуха

Результаты, представленные на рисунке 6, могут быть аппроксимированы полиномом второй степени

$$S = -45 + 133v_{фр} + 25v_{фр}^2. \quad (4)$$

Это позволяет определить коэффициенты D_i и E_i в уравнении (2) и использовать их при задании характеристик анизотропного фильтра при моделировании в CFD пакетах программ.

Заключение и выводы

Полученные результаты дают возможность моделировать пространственное течение воздуха внутри короба ВКУ и определять поля параметров потока на входе и выходе из трубного пучка без прямого численного моделирования течения воздуха в межтрубном пространстве. Расчетная модель ВКУ при этом значительно упрощается и становится возможным проведение многовариантных расчетов для оптимизации его конструкции.

Работа проводилась при финансовой поддержке Государственного заказчика, по Госконтракту № 16.526.12.6013.

Список литературы:

1. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно-конденсационные установки. М.: МЭИ, 2002. 207 с.
2. Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А., Дунаев С.Н., Колесников Н.В., Шифрин Б.А. Теплогидравлические процессы в воздушных конденсаторах паротурбинных установок // Вестник Московского энергетического института. 2012. № 2. С. 5-12.
3. Федоров В.А., Мильман О.О., Артемов В.И., Федоров Д.В., Ананьев П.А., Кирюхина А.А. Новое направление в создании высокоэффективных конденсаторов паротурбинных установок // Вестник Московского энергетического института. 2010. № 3. С. 37-43.
4. Radosavljevic D., Spalding D.B. Simultaneous Prediction of Internal and External Aerodynamic and Thermal Flow Fields of a Natural-Draft Cooling Tower in a Cross-Wind // Proc. Int. Cooling Tower Conf., EPRI GS-6317, 1989.
5. du Toit C.G., Kroger D.G. Modelling of the recirculation in mechanical-draught heat exchangers // R&D Journal. 1993. Vol. 9, № 1. P. 2-8.
6. Wanli Zhao, Qiyue Wang, Peiqing Liu. The experimental investigation of recirculation of air-cooled system for a large power plant // Energy and Power Engineering. 2010. No 2. P. 291-297.
7. Leila Borghei, Ramin Haghighi Khoshkhou. Wind effect on air-cooled condenser performance // Proc. of Int. Conf. "New Aspects of Fluid Mechanics, Heat Transfer & Environment". Taipei, Taiwan, 2010. P. 193-198.
8. Подготовка и участие в испытаниях аппаратов воздушного охлаждения: отчет по теме " Ж-К1-02-10 (№ 10006)" / КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; рук. Жинов А.А.; исполн.: Шевелев Д.В., Карышев А.К. и др. Калуга, 2010. 47 с.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

Simulation of air pressure losses in finned tube bundle of an air condenser

03, March 2013

DOI: [10.7463/0313.0544307](https://doi.org/10.7463/0313.0544307)

Jinov A.A., Shevelev D.V., Anan'ev P.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch
k1kf@bmstu-kaluga.ru

The authors describe an approach to numerical simulation of air flows in the box of an air condenser by replacing the tube bundle geometry with an anisotropic filter - that is, with a selected area in the computational model with the given hydraulic resistance. Hydraulic characteristic of the finned air condenser's heat-exchange surface was determined by using CFD (Computational Fluid Dynamics) along with FlowVision, Phoenics and OpenFoam software in order to set the properties of the anisotropic filter correctly. The obtained results allow to simulate a three-dimensional air flow inside the box of an air condenser and determine parameter fields of the flow at the input and output of the tube bundle without direct numerical simulation of the air flow in the intertubular space.

Publications with keywords: [modelling](#), [air condenser](#), [computational fluid dynamics](#)
Publications with words: [modelling](#), [air condenser](#), [computational fluid dynamics](#)

References

1. Mil'man O.O., Fedorov V.A. *Vozdushno-kondensatsionnye ustanovki* [Air-condensing units]. Moscow, MEI Publ., 2002. 207 p.
2. Fedorov V.A., Mil'man O.O., Anan'ev P.A., Dunaev S.N., Kolesnikov N.V., Shifrin B.A. Teplogidravlicheskie protsessy v vozdushnykh kondensatorakh paroturbinnnykh ustanovok [Thermal-hydraulic processes in air condensers of the steam-gas installations]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo institute*, 2012, no. 2, pp. 5-12.
3. Fedorov V.A., Mil'man O.O., Artemov V.I., Fedorov D.V., Anan'ev P.A., Kiriukhina A.A. Novoe napravlenie v sozdanii vysokoeffektivnykh kondensatorov paroturbinnnykh ustanovok [New direction of development of the high-active condensers for the steam-turbine plants]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo institute*, 2010, № 3, pp. 37-43.

4. Radosavljevic D., Spalding D.B. Simultaneous Prediction of Internal and External Aerodynamic and Thermal Flow Fields of a Natural-Draft Cooling Tower in a Cross-Wind. *Proc. Int. Cooling Tower Conf.*, EPRI GS-6317, 1989.
5. du Toit C.G., Kroger D.G. Modelling of the recirculation in mechanical-draught heat exchangers. *R&D Journal*, 1993, vol. 9, no. 1, pp. 2-8.
6. Wanli Zhao, Qiyue Wang, Peiqing Liu. The experimental investigation of recirculation of air-cooled system for a large power plant. *Energy and Power Engineering*, 2010, no. 2, pp. 291-297.
7. Leila Borghei, Ramin Haghighi Khoshkhou. Wind effect on air-cooled condenser performance. *Proc. of Int. Conf. "New Aspects of Fluid Mechanics, Heat Transfer & Environment"*. Taipei, Taiwan, 2010, pp. 193-198.
8. Zhinov A.A., Shevelev D.V., Karyshev A.K., et al. *Podgotovka i uchastie v ispytaniakh apparatov vozdušnogo okhlazhdeniia: otchet po NIR* [Preparation and participation in the testing of air-cooling apparatus: a report on scientific research works]. Kaluga branch of the Bauman MSTU, Kaluga, 2010, 47 p. Non published.
9. Loitsianskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and Gas Mechanics]. Moscow, Drofa, 2003. 840 p.